

特集：震災復興に貢献する粉体技術

放射能汚染土壌減容化のキーテクノロジーは 固液分離技術

Solid/Liquid Separation is the Key Technology
for Reducing the Volume of the Radio-Contaminated Soil

JHGS 株式会社こな椿ラボ、名古屋大学名誉教授 椿 淳一郎
JunIchiro TSUBAKI

1. はじめに

今年の3月ある学会の企画に参加し、福島県川内村を視察し遠藤雄幸町長の講演を聴いた。遠藤町長の真っ直ぐでひたむきな復興への姿勢には、聴いている誰もが感銘を受けた。

川内村に限らず福島県を車で走ると、あっちでもこっちでも黒いフレコンバッグを目にする。除染された行き場のない放射能汚染土壌である。

除染が進むにつれて、このフレコンバッグの仮置き場の確保が難しくなり、汚染土壌の減容化が強く望まれている。

減容化技術については、2011年度に福島県¹⁾が実施した実証事業、同年度に環境省²⁾が実施した実証事業と、内閣府³⁾が同年度に実施した実証事業でいくつかの減容化技術が試されている。

本稿では、我々が減容化技術を開発するに至った経緯とその技術内容を、実証事業で提案されている技術と比較しながら以下に紹介したい。

2. 開発に至った経緯

筆者は現職時代、スラリーの挙動解明や特性評価に興味・関心を持ち研究を進めてきたが、その過程で、難汙過性粒子でもスイスイと汙過できる面白い汙過装置を開発し、デカフと名付けて現在普及に努めている。

デカフとは、どんな汙過装置か。偶然であるが、本号 p. 58の粉体入門講座「スラリー徒然草-12」で少し詳しく紹介しているので、そちらをご参照いただきたい。

このデカフを開発したことが減容化技術の開発へとつながっていく。

事故後、炉心冷却水の浄化が問題となった。水

中に溶け込んだ核種イオンをゼオライトに吸着させて浄化し、冷却水を循環利用しようというものである。

核種イオンはゼオライト粒子の表面に到達して、そこで吸着するかさらに内部まで拡散して吸着する。したがって、吸着機構から考えたら、粒子を小さくすれば、量は同じでも表面積は大きくなり、拡散パスも短くなるので、粒子は小さければ小さいほど良いことになる。

しかし粒子を小さくすればするほど、粒子と浄化された水の分離は難しくなるので、実際には、数mmのゼオライト粒子をカラムに充填し、そこに汚染水を通し浄化している。

我がデカフならもっと高効率の浄化装置を作れるのに…、と思いながら情報を集めていると、日本原子力研究開発機構（JAEA）が福島大学付属中学校のプールで除染をするという情報を得た。

デカフの売り込みもかねて、7月下旬見学に行った。除染の方法は、プールにゼオライト粒子と凝集剤を撒き、ポンプで水流を起こして攪拌し一昼夜静置した後、浄化された水を汲み出した後ゼオライト泥漿をポンプアップし、写真-1のように汙過・乾燥してゼオライト粒子を取り出すというオーソドックスなものであった。



写真-1 福島大学付属中学校プールの除染風景

実験を担当していたのはJAEAの研究者の方々であるが、ゼオライトと聞いて、1kgで2万円もするゼオライトを手配したという。その後気づいて、実際には1kg数円の天然ゼオライトを使っていたが、専門が違えばそういうこともありうるなどその時は別に気にならなかった。

除染作業は全て人力なので、装置化は考えないのかと聞いたら、それは我々の役目ではないとの答えであった。

なるほど、餅は餅屋というから、しかるべき学会や業界団体に協力を依頼するのだろう、それにJAEAも事故を“起こした”側だからやりにくいだろうなど、一人納得した。

が、現実には先に紹介した3つの実証事業全てを、JAEAが取り仕切っている。しかも「除染技術に関して高い知見を有した立場から」²⁾とのことである。

事故を起こした当事者が事故処理を任されるとは、何とも不思議な話である。

水中に溶け込んだCs⁺は、次章で述べるようなメカニズムで土壤中に捕捉されるので、夏を過ぎると除染の対象は水から土壌へと移った。我々もそれに対応して汚染土壌の減容化装置開発に着手した。

3. 除染と減容化の原理

CsはNaやKと同じアルカリ金属なので、層状ケイ酸塩鉱物の中に安定して取り込まれる。

東電の原発から放出され地表に降ったCsIは、容易に水に溶け出しCs⁺とI⁻イオンとなる。Iは半減期が短いので、I⁻イオンは既に放射能を失っている。Cs⁺は雨水によって地中へと運ばれ、現在は土壌中の層状ケイ酸塩鉱物に取り込まれている。

したがって、Cs⁺を取り込んだ地面の表層を取り去ってやれば、その場所の放射線量を下げることができる。これが現在行われている土壌除染の原理である。

Cs⁺は層状ケイ酸塩鉱物に固定されているので、剥ぎ取られた表土から層状ケイ酸塩鉱物だけ取り除いてやれば、減容化できることになる。

では、どうやって取り出すか。層状ケイ酸塩鉱物は土壌学でシルト、粘土と定義される粒子径区分に含まれていて、20μm以下がシルト、2μm以下が粘土と定義されている。したがって、この粘

土質（シルト+粘土）を除去してやれば減容化できることになる。

また、熱処理や化学処理によってCsだけを抜き取る技術も提案されている。

4. 実証事業に見る減容化技術

福島県の実証事業には6社、環境省の事業には5社、内閣府の事業には8社が参加している。1社が2つの事業に参加しているのので、18社の減容化技術が試されたことになる。

表-1に実証事業で実施された減容化技術を分類したが、湿式の粘土質除去による方法が圧倒的に多い。

表-1 実証事業で実施された減容化技術の分類
(熱処理の1件は湿式と併用)

減容化原理		件数
粘土質の除去	湿式	15
	乾式	1
粘土質からCsの除去	熱処理	2
	化学処理	1

湿式減容化プロセスのフローを図-1(a)に示したように、減容化技術は固液分離・分級プロセスそのものである。プロセスの要素技術を表-2にまとめた。粘土質を洗い出す洗浄工程、砂礫と粘土質を分離する分級にはさまざまな試みがなされているが、粘土質の分離回収に使える技術は凝集・脱水プレスしかないようである。

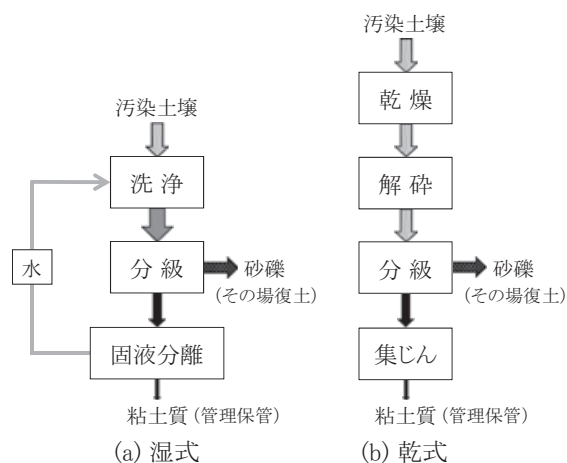


図-1 汚染土壌減容化プロセス

それぞれの事業報告書には、除染率、減量率、時間当たりの処理能力が記載されているが、それぞれの技術の完成度はまちまちで、除染対象土壌も異なっているので、一つの目安と理解すること

表-2 湿式汚染土壌減容化プロセス中の要素技術

洗 浄	分 級	固液分離
回転ドラム 攪拌機 コンクリートミキサー アトリッション 混気ポンプ ボールミル 高圧ジェット水流 ナノ、マイクロ気泡	沈降分級 振動ふるい サイクロン 浮上分離 シックナー	凝集・脱水プレス

が無難のようである。

1社だけ、**図-1(b)**に示すような乾式プロセスで減容化を試みている。水を使わないことは大きなメリットではあるが、砂礫から付着している粘土質粒子を乾式で分離するためには、土壌を十分に乾燥しなければならない。また乾燥時にメニスカス力によって微粒子がさらに強く付着することもあるので、実用化は難しいのではないかと思う。データを見てみても湿式より劣っている。

植物を育てる養分は粘土質に蓄えられるので、粘土質が取り除かれた土壌では作物を作れない。したがって、耕作に適した状態を保ったままでCsが抜き出せれば、農家には朗報となる。

熱処理によってCsを抜き出す試験は2社によって行われたが、700~800℃で熱処理した会社は成果を上げることができなかった³⁾。もう1社は、処理土壌の2倍の反応促進剤を加えて1,300℃での熱処理で、99.9%のCsを除去したと報告されている³⁾。しかし原土の2倍もの反応促進剤が加えられた処理土壌が耕作に適さないことは、実証事業で試してみるまでもなくわかるように思う。それに、1,300℃という温度は磁器を焼く温度で、膨大なエネルギー消費である。

一方の化学処理とは、シュウ酸で粘土からCsを抽出する方法³⁾である。Csが抽出された土壌で植物が育てば、非常に重要な除染・減容化技術となるが、残念ながら農地土壌としては使えないとのことである³⁾。

この技術を開発した会社は、シュウ酸中のCsをゼオライト粒子に吸着させれば、シュウ酸の繰り返し利用が可能であるとアピールしているが。そのゼオライトはどうするのか、放射能を帯びた廃棄物として取り扱われるのであれば、化学処理などせず粘土質だけを取り出せばすむ話である。

なぜ、これらの技術が実証事業への申請305件の中から採択25件の一つとして選ばれた³⁾のか、理解に苦しむところである。

5. デカフによる減容化

5-1 デカフの利点

我々が開発している減容化技術も、デカフの応用技術なので**図-1(a)**に示す湿式プロセスであるが、我々の一番の強みは凝集剤を使わないことである。

凝集剤は微粒子の沈降を促進し、汙過抵抗を下げるために添加されるが、汙過ケーキはかなり嵩高くなるために、高い圧力でケーキを圧縮しなければならない。汙過器はその圧力に耐えなければならないので、装置は頑丈な構造にならざるを得ない。

我がデカフはフィルターチューブ内を流れながら濃縮されていくので、頑丈な装置は必要ない。

汎用の凝集剤に含まれているAlイオンは植物に害を及ぼすので、凝集剤で処理された土壌は農地に戻すことは難しい。

デカフでは、分散剤として植物に無害な水ガラスを添加することはあるが、凝集剤を添加することはないので汚染土壌の放射能が抜ければ、再び農地に戻すことができる。

また、減容化された汚染土壌は固化したケーキではなく、流動状態を保っているので、バルブ操作一つで簡単に取り出すことができる。

5-2 洗浄、分級技術の開発

開発にあたっては次の3つを目標とした。

- 1) 汚染地域がはなはだ広いため、その場で除染・減容化作業ができるよう、4トントラックに車載のまま作業ができる装置とする。
- 2) 処理能力は1時間0.5トン以上。
- 3) できるだけ低価格。

写真-2に初代の減容化装置を示したが、スプレー内蔵の振動ふるいを使って洗浄と分級を一段でやることを試みた。

しかしいかに振動ふるいとはいえ、目詰まりを防ぐことができないばかりではなく、振動ふるいだけでは洗浄が不十分であることがわかった。

そこで二代目の装置では、振動ふるいは大きな石や草の根を取るストレーナーとして用い、洗浄は**写真-3**に示すように回転攪拌翼の付いた洗浄槽で行った。

できるだけ少ない水で洗浄効果を上げるため、洗浄槽は3本とし、土壌と水の流れを向流にして3段洗浄できるように工夫した。



写真-2 初代減容化装置

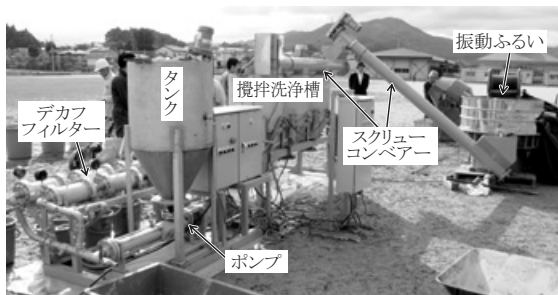


写真-3 二代目減容化装置

写真-3は昨年(2012年)9月に本宮市の中学校で行った除染試験の様子であるが、スクリュウコンベアーの下に見える帽子を被った紳士は大玉村の村長さんで、1時間近く熱心に我々の作業を見学された。

写真-4に、地表から深さ約10cmにあった汚染土壌、表土を除かれた地面、洗浄砂礫を示した。表面の汚染土壌は $3,100\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ の線量であるが、表面から10cm下にある土壌の線量は $470\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ であり、放射能の汚染は表面にとどまっていることがわかる。

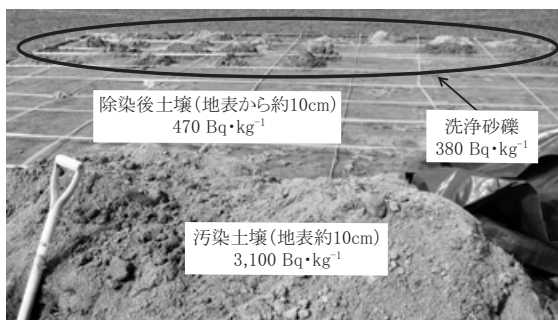


写真-4 汚染土壌、除染後土壌、洗浄砂礫

また、洗浄砂礫の線量は $380\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ であったので、問題なく元に戻すことが可能であった。洗浄砂礫の拡大写真を写真-5に示したが、粘土質はほとんど含まれず文字通りの砂礫である。

写真-5に見られるように、汚液には全く濁り

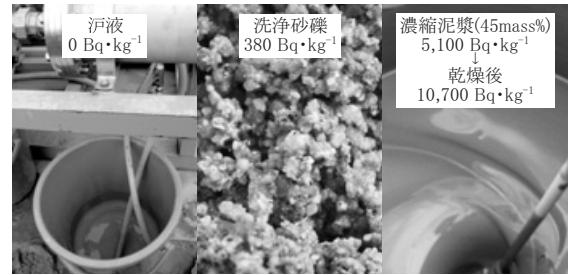


写真-5 汚液, 洗浄砂礫, 濃縮泥漿

がなく放射線量もゼロである。粘土質泥漿は45mass%まで流動性を保ったまま濃縮され、放射線量は $5,100\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ で、乾燥後の放射線量は $10,700\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ まで上がった。

濃縮された粘土質泥漿は、写真-6に示すように布袋にポンプ圧で回収される。限界近くまで濃縮されているので、粘土質がしみ出してくることはほとんどない。



写真-6 濃縮粘土質泥漿保管

この布袋を地中に埋め上に数十cmの土で覆えば放射線を遮蔽できるので、その場で保管することが可能である。

昨年秋の本宮市での減容化試験では、図-2に

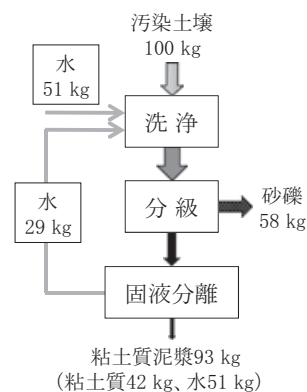


図-2 汚染土壌減容化の収支例

示すとおり管理保管すべき汚染土壌の量を40%減らすことができた。この試験で対象とした土壌は、畑並みに粘土質が多い土壌であったので、宅地などであれば減容化率はさらに上がると思われる。

本宮市での試験で、建設現場などで昔から使われているミキサーで土壌を洗浄してみたところ、我々が開発した洗浄槽と同等の洗浄能力がある上に、操作性、処理能力、価格の面では我々の装置よりはるかに優れていた。現場で育てられてきたローテクに脱帽である。

ローテクミキサーをベースにした向流洗浄装置の開発を終わり、第三世代の除染・減容化装置がまもなく完成する予定である。

6. おわりに

本拙稿が皆さまの目に触れている頃には、我々の除染・減容化装置が福島復興のお役に立っているよう、これからもう一踏ん張りしなければと思っています。

最近安倍首相は「高い安全技術を誇る」と言って、日本の原発セールスに忙しいが、是非我々の装置もセットで売り込んでもらいたい。なにしろ、あの東電原発事故の原因究明すらすんでいないのだから。

この開発研究は多くの方々のご支援ご援助によって行われた。科学技術交流財団様には文科省「地域イノベーション戦略支援プログラム」を通じて、さまざまのご支援をいただいた。海和工業様にはパートナーとして全面的にご協力いただい

ている。福島で除染試験を行えるのは、福島医療生協様とエスエフ太陽興産様のご尽力によるものである。晃栄産業様には振動ふるいをご寄付いただいた。そして、研究室のスタッフと学生諸君は粉雪が舞う中でも猛暑の中も、骨身を惜しまず実験を進めてくれた。皆様方には、この場を借りて心からのお礼を申し上げる。

引用文献

- 1) “平成23年度 福島県除染技術実証事業実地試験結果”、福島県生活環境部 (2012・4)、
<http://wwwcms.pref.fukushima.jp/download/1/jyosen-houkoku 0427.pdf>
- 2) “平成24年度除染技術評価等業務報告書”、独立行政法人日本原子力研究開発機構 (2014・10)、
http://www.jaea.go.jp/fukushima/techdemo/h23/techdemo_report.pdf
- 3) “福島第一原子力発電所に係わる避難区域等における除染実証業務【除染技術実証試験事業編】報告書”、独立行政法人日本原子力研究開発機構 (2014・6)、
http://www.jaea.go.jp/fukushima/kankyoanzen/d-model_report/report_3.pdf



つばき じゅんいちろう
椿 淳一郎
JHGS (株) こな椿ラボ 主宰
名古屋大学名誉教授

〒509-0135 岐阜県各務原市鶴沼羽場町5-72
TEL: 058-370-4538 FAX: 058-370-4538
E-mail: tsubaki@jhgs.jp
HP: <http://konatsubaki.jhgs.jp/>

